

引用格式：付欣, 陈瑞琼, 刘娅, 等. 多基准终端星站钟差融合方法对比分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 104-109.

## 多基准终端星站钟差融合方法对比分析

付欣<sup>1,2</sup>, 陈瑞琼<sup>1</sup>, 刘娅<sup>1,2,3</sup>, 李孝辉<sup>1,2</sup>, 曾迎春<sup>4</sup>, 朱敏<sup>4</sup>

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600
- 成都金诺信高科技公司, 成都 610097

**摘要:** 随着科技的发展, 国民经济、国防建设等行业对高精度时间的要求越来越高。目前通过标准时间复现系统可以实现 2 ns 以内的授时精度, 但是仍然不能满足一些高精度时间频率用户的需求。当前使用的单一基准站在实际观测中会产生随机误差从而影响复现结果, 为了将随机误差降到最小, 提出了 4 种基于多基准终端的钟差数据融合方法, 用于提高系统中标准时间的复现精度。通过对这 4 种方法进行分析研究, 发现通过将各个基准终端 GPS (global positioning system) 和 BDS (Beidou navigation satellite system) 的星站钟差数据分开进行  $3\sigma$  剔除粗差后, 再进行加权平均的方法, 复现效果最优, 可以有效解决只用单一基准终端数据所造成的复现精度低的问题, 通过测试分析, 相较使用单一基准终端, 使用多基准终端的复现精度可由 2 ns 提升至 0.35 ns。

**关键词:** 时间频率; 时间复现; 星站钟差; 数据融合

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0104-06

## Comparative analysis of satellite station clock difference fusion methods for multi-reference terminals

FU Xin<sup>1,2</sup>, CHEN Rui-qiong<sup>1</sup>, LIU Ya<sup>1,2,3</sup>, LI Xiao-hui<sup>1,2</sup>, ZENG Ying-chun<sup>4</sup>, ZHU Min<sup>4</sup>

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- Chengdu Kingnotion High-Technology Company Limited, Chengdu 610097, China

**Abstract:** With the development of science and technology, the national economy, national defense construction and other industries have increasingly high requirements for high-precision time. At present, the time service accuracy within 2 ns can be achieved through the standard time reproduction system, but still cannot meet the needs of some high-precision time frequency users. To minimize the random error, four clock error data fusion methods based on multiple reference terminals are proposed to improve the accuracy of the standard time in the system. Through the analysis and research of these four methods, it is found that the method of eliminating

收稿日期: 2023-04-16; 接受日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(12003040); 中国科学院“西部之光”西部交叉团队重点实验室专项(xbzg-zdsys-202120)

the gross error of GPS and BDS clock difference data of each reference terminal separately and then carrying out weighted average has the best reproduction effect, which can effectively solve the problem of low reproduction accuracy caused by using only a single reference terminal data. Through the test and analysis, compared with using a single reference terminal, the reproduction accuracy of using multiple reference terminals can be improved from 2 to 0.35 ns.

**Key words:** time frequency; time reproduces; satellite station clock difference; data fusion

时间在人类发展和科技进步的过程中都发挥着重要作用。中国科学院国家授时中心承担着我国标准时间的产生、保持和发播任务, 建立和保持了溯源至协调世界时 UTC 的国家标准时间 UTC (NTSC) (Coordinated Universal Time, National Time Service Center), 且与 UTC 之间的偏差保持小于 5 ns。同时为了满足国民生产和国防建设等各方面的需求, 国家授时中心也在推进高精度时间服务研究<sup>[1-2]</sup>, 通过多样化手段将建立的国家标准时间提供给各行业用户, 服务于我国国民经济发展, 其中时间传递和同步技术是高精度时间服务的关键<sup>[3]</sup>。

标准时间远程复现技术是国家授时中心分析了国内外多种主要的远距离时间传递技术的性能、成本并结合当前具备的装置资源条件, 以及市场对高精度时频信号、时间溯源等服务的需求而提出的一种新方法<sup>[2-4]</sup>。目前, 国家授时中心已经建立了基于国家标准时间 UTC (NTSC) 的远程复现系统, 既能满足持续远程时间的比对和校准, 又能实时根据比对结果实施驾驭, 实现与标准时间的同步、向

UTC 溯源的需求<sup>[5-7]</sup>。其中, 远程时间比对基准终端为整个标准时间远程复现系统提供参考, 其测量的星站钟差数据的完好性和可靠性关系到整个系统的可用性。单个基准终端所测星站钟差数据的连续性和稳定性都不可靠, 容易造成复现效果差、精度低。为了提高可靠性、提升复现精度, 通常需要多个终端同时运作。若仅是用作备份又容易造成资源的浪费, 多个基准终端的高精度融合结果不仅可以保障数据的可靠性、拓展服务的范围, 还可以应对断电、接收机故障等多种异常情况<sup>[8-9]</sup>。本文提出了 4 种基于多基准终端的星站钟差数据融合方法, 进行了试验并对其优劣进行分析比较。

## 1 工作原理

### 1.1 标准时间复现原理

标准时间远程复现系统由远程时间比对基准终端、标准时间复现终端和数据分析处理中心组成, 如图 1 所示。

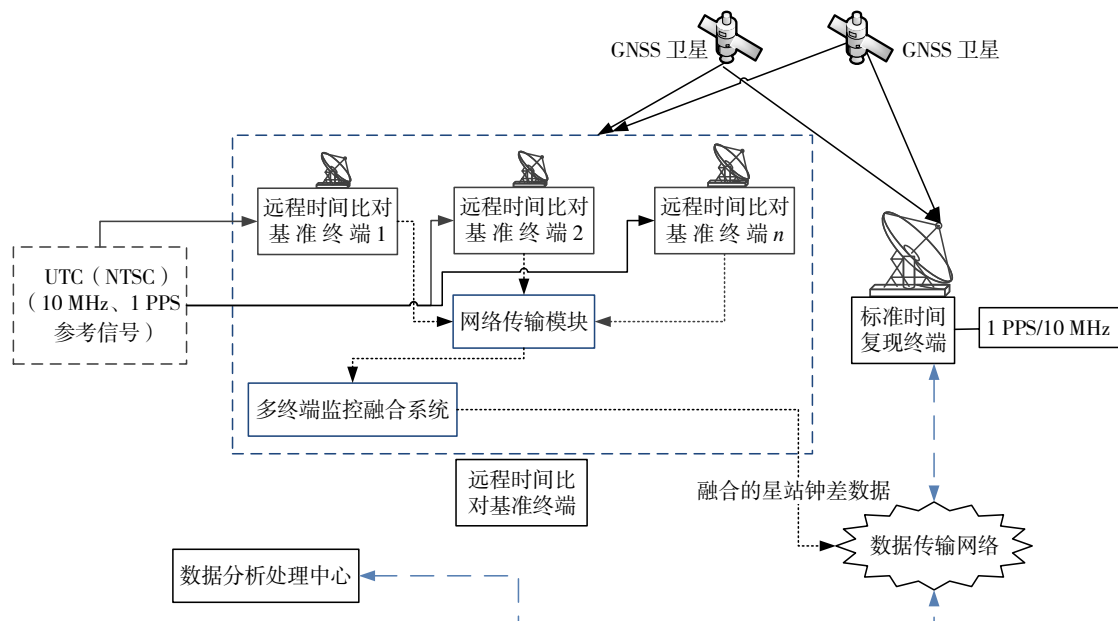


图 1 UTC (NTSC) 远程复现系统原理图

其工作原理具体可表述为, 远程时间比对基准终端与标准时间复现终端同时观测各自所在地的可视 GNSS (global navigation satellite system) 卫星, 其中, 各个远程时间比对基准终端分别观测各自的可视 GNSS 卫星, 且均按照约定的观测周期采集并实时处理测量数据, 再通过修正信号传输链路误差, 改正伪距, 得到本地参考时间与 GNSS 时间的偏差, 称为星站钟差。在完成一个观测周期后, 各台远程时间比对基准终端会实时计算出星站钟差数据, 经网络传输模块进行传输, 通过多终端监控融合系统将传输过来的多个基准终端的星站钟差进行融合, 再通过数据传输网络将两端的数据实时发送至数据分析处理中心, 数据分析处理中心通过计算得到基准终端与复现终端的两地参考时间之差后, 将计算结果实时发送至标准时间复现终端, 这个实时的复现结果称为时间校准数据。这样标准时间复现终端在收到数据后结合历史数据就可以生成对本地原子钟输出参考信号的频率驾驭量, 从而控制原子钟的输出, 使其保持与远程时间比对基准终端的参考信号 UTC (NTSC) 同步。

## 1.2 融合原理

按照对数据加工处理层次的不同, 数据融合可以分为数据级融合、特征级融合和决策级融合等 3 个层次。数据级融合是直接采集的原始数据层或其变换数据层上进行的融合, 这种方法可以最大程度保留原始数据的特征, 并提供足够的细节信息。特征级融合是先对原始数据进行预处理, 包括数据清洗以及数据特征提取, 再对所提取到的数据特征进行融合。这种方法可以尽快地找到数据特征之间的关系, 从而去除冗余无效的数据信息, 避免数据干扰。决策级融合是在多源原始数据的基础上, 直接进行决策和分析, 并将多源数据的多种决策结果进行融合, 从而获得总体决策结果<sup>[10-13]</sup>。本文所用融合属于特征级融合。

结合上述前人观点及本文研究的方法, 可将本文所用数据融合技术归纳为: 在一定准则下, 通过对多个远程时间比对基准终端的星站钟差数据进行筛选过滤以及合并处理后, 得到更为准确、可靠的时间校准数据<sup>[14-17]</sup>。

星站钟差的数据融合算法主要包括不同异常情况下数据的粗差剔除以及对剔除粗差后的单周

期数据的融合。本文在对数据进行筛选过滤时用到两类方法, 分别为  $3\sigma$  准则和构建基于标准差 (standard deviation, STD) 的滑动窗口。其中本文方法中采用的  $\sigma$  均为去除最值后的标准差, 即把导出数据  $t_i$  中的最大值和最小值去掉后, 计算剩余  $t_i$  的均值:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1)$$

式 (1) 中:  $N$  为数据总量减 2,  $i$  表示卫星号, 然后再计算  $t_i$  的标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

将所有  $t_i$  与上述标准差进行比较, 若

$$|t_i - \bar{t}| > 3\sigma, \quad (3)$$

则视为超过粗差门限, 将这样的  $t_i$  剔除。

在对数据进行分析处理时发现, 只针对当前周期的数据融合可能存在异常, 便提出构建基于标准差的滑动窗口, 以当前周期之前的 10 个参与数据融合计算有效星站钟差数据作为参考, 通过历史数据判断当前周期星站钟差的稳定性, 降低单一数据造成的不稳定性和不准确性, 实时跟踪融合结果, 结合历史数据来优化融合结果。同时通过对卫星出现及未出现次数的统计来判断卫星的进出, 对刚进入还不稳定的卫星星站钟差数据进行剔除, 以此来保证参与融合的星站钟差数据的稳定性, 从而提升复现精度。

观测过程中存在多种误差, 如观测中产生的随机误差以及卫星进出时由于高度角比较低, 载噪比低, 观测数据中的多路径效应大, 也可能存在粗差等等。这些误差会造成数据异常, 严重影响数据融合的结果, 从而影响复现精度。本文中对数据进行合并处理的重点是把多个基准终端的星站钟差数据合并起来使用, 采用加权平均的方法。本文主要对比不同方法对星站钟差融合结果的影响。

## 2 试验方法及结果

本文采用 4 种方法进行分析对比, 远程时间比对基准终端位于西安临潼国家授时中心实验室, 标准时间复现终端位于天津武清观测站, 试验过程中

采用同一组连续的 48 h 星站钟差数据，测试时间为 2022 年 3 月 8 日 0 时至 3 月 10 日 0 时（UTC 时间），该数据来源于远程复现系统中的远程时间比对基准终端，系统共视周期为 1 min。在相同的条件下，比较不同方法对复现结果的影响，图 2 为测试结构图。

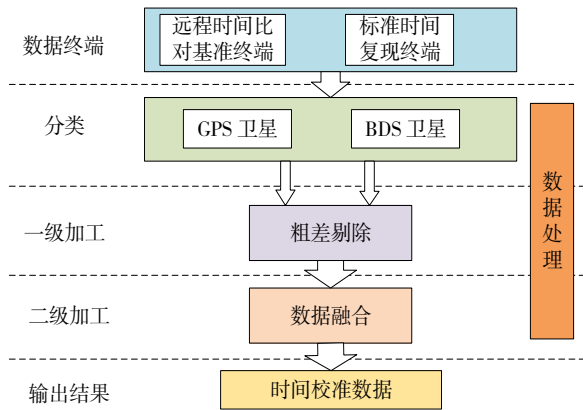


图 2 测试结构图

图 3 所示为使用单一基准终端星站钟差数据的复现结果图，统计结果均值为 4.23 ns，标准差为 0.88 ns，从图中可以看出，在某些时段波动较大。为了改善使用单一基准终端对复现结果的绝对影响，下面提出了 4 种使用多基准终端数据融合的方法，并对结果进行分析对比。

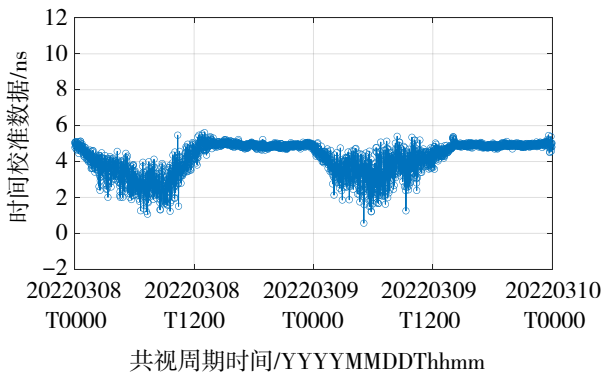


图 3 单一基准站复现结果图

方法一可描述为：将多个远程时间比对基准终端的星站钟差数据首先分别进行  $3\sigma$  剔除，再对处理后共同可视卫星的星站钟差数据进行加权平均，从而融合为一组星站钟差数据，图 4 为使用方法一后的复现结果。

在图 4 中可以看到，该方法 48 h 内的时差结果波动较大。可见在共同可视卫星的星站钟差数据融合之前先进行粗差剔除，数据量虽然比较完整，

但是没有考虑到多台基准终端参考设备之间的联系，可能会由于卫星进出，接收机偶发失锁等原因造成自身的数据波动，容易将同时发生较大变化的卫星当作异常星剔除掉，该方法不利于后期进行复现测试。且与图 3 对比，无法解决单一基准终端对复现结果产生的影响。

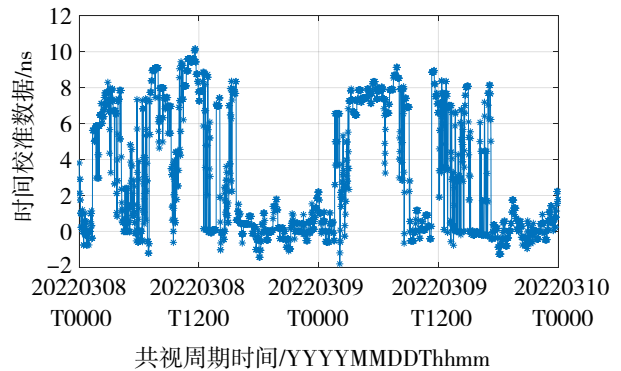


图 4  $3\sigma$  准则应用于基准端数据融合前

方法二是对第一种方法的改进，区别在于将多个基准终端共同可视卫星的星站钟差数据先进行比较融合，再对融合处理后的数据进行  $3\sigma$  剔除，避免多个基准终端可视卫星的星站钟差同时变化造成“误删”。图 5 为将基准终端参考设备间星站钟差数据比较融合后再进行  $3\sigma$  剔除的复现结果。

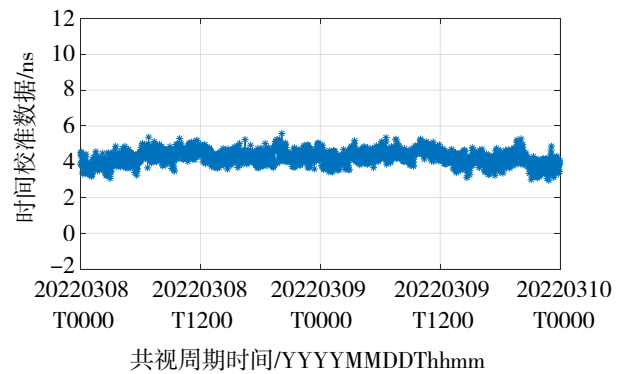


图 5  $3\sigma$  准则应用于基准端数据融合后

在图 5 中可以看到，方法二的时差结果较方法一有了显著提升，时差数据基本稳定。说明在进行粗差剔除时应把握好剔除对象。在本文的试验中，剔除及融合对象均为多个基准终端的星站钟差数据，而不是分开对单个终端的星站钟差数据进行处理。与图 3 单一基准终端的复现结果相比，时间校准数据的稳定度得到很大提升。

在实时处理的过程中，将历史数据作为参考进行比较有助于对实时数据的筛选。复现系统中的设

备都具有实时保存历史数据的功能,为了得到更稳定的星站钟差数据组,提出方法三:构建一个滑动窗口,针对每颗卫星,以当前周期的前 10 个有效周期为参考,计算出这 10 个参考周期的标准差,用  $3\sigma$  准则判断当前周期是否符合标准,剔除掉单颗卫星中起伏较大的星站钟差。图 6 即运用 STD 滑动窗口进行粗差剔除和数据融合的复现结果。从图 6 可以看到,该方法与方法二相比较,整体引入了较多“毛刺”,影响复现效果。但与图 3 单一基准终端的复现结果相比仍有很大改善。

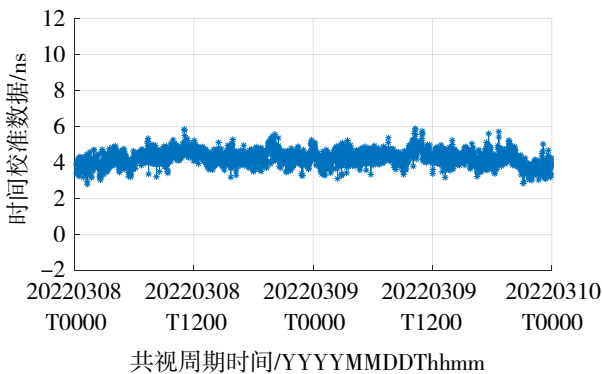


图 6 STD 滑动窗口进行粗差剔除并融合

最后,方法四考虑到观测卫星中包含了 GPS (global positioning system) 卫星和 BDS (Beidou navigation satellite system) 卫星,故将 GPS 卫星和 BDS 卫星分开处理分析。同样在多个基准终端共同可视卫星的星站钟差数据进行波动比较融合的前提下进行试验,避免基准终端可视卫星的星站钟差同时变化造成“误删”。

图 7 为将共同可视的 GPS 和 BDS 卫星分开进行  $3\sigma$  剔除后进行融合的复现结果。从图 7 中可以明显看出该方法下的处理的结果较为光滑,优于上述 3 种方法。很大程度上解决了单一基准终端星站钟差数据的不稳定性对复现结果的影响。

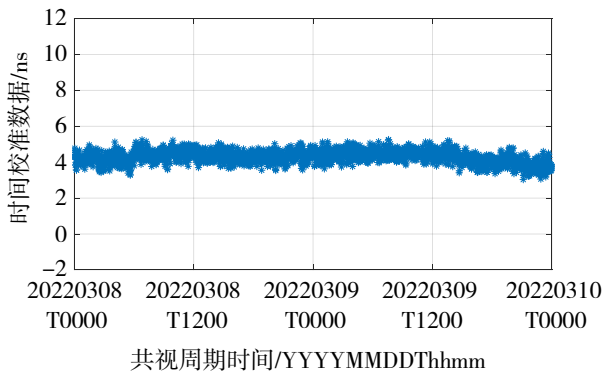


图 7 GPS 和 BDS 分别进行  $3\sigma$  剔除并融合

### 3 对比及结论

通过第 2 节对 4 种方法的对比分析,将其复现结果进行统计计算,如表 1 所示。

表 1 4 种方法下时间校准数据的均值和标准差对比

复现方法	均值/ns	标准差/ns
单一基准终端的复现结果	4.23	0.88
$3\sigma$ 准则应用于基准终端数据融合前	3.14	3.52
$3\sigma$ 准则应用于基准终端数据融合后	4.24	0.39
STD 滑动窗口进行粗差剔除并融合	4.25	0.42
GPS 和 BDS 分别进行 $3\sigma$ 剔除并融合	4.29	0.35

从表 1 中可知,针对同一组 48 h 的星站钟差数据,单一基准终端的星站钟差数据计算得到的时差均值为 4.23 ns,标准差为 0.88 ns;方法一中先对不同基准终端的星站钟差进行粗差剔除之后再进行参考设备间的星站钟差融合,其所得时差均值为 3.14 ns,标准差为 3.52 ns;方法二直接对多个基准终端间的星站钟差融合值进行粗差剔除的方法下,时差的周期均值为 4.24 ns,标准差为 0.39 ns;方法三是针对多个基准终端间的星站钟差融合值,综合  $3\sigma$  准则和 STD 滑动窗口来进行粗差剔除,所得时差的均值为 4.25 ns,标准差为 0.42 ns;最后方法四在粗差剔除时将 GPS 卫星和 BDS 卫星的星站钟差分开处理,融合后所得时差的均值为 4.29 ns,标准差值为 0.35 ns。由此可见,对多个基准终端间的星站钟差融合值进行粗差剔除后,最终计算出的时差结果的总体趋势更加平缓稳定,也表示将 GPS 卫星和 BDS 卫星分开处理有利于得到更稳定的时差结果。

### 4 结语

本论文主要基于标准时间远程复现方法,对多

基准终端的星站钟差数据融合展开了研究。通过对提出的4种融合方法进行试验,并对其进行对比分析,得出如下结论。

① 本文提出的对标准时间复现系统中多个基准终端进行的星站钟差融合的方法中,针对多个基准终端的星站钟差融合值通过 $3\sigma$ 准则剔除粗差、针对单颗卫星构建STD滑动窗口进行筛选以及分开处理GPS和BDS卫星的星站钟差数据均可以有效改善星站钟差的融合结果。

② 将多个基准终端的共同可视卫星中的BDS和GPS卫星的星站钟差数据分别进行 $3\sigma$ 剔除粗差后,再进行加权平均所得时差的均值为4.29 ns,标准差为0.35 ns,效果最好,有效地解决了只使用单一基准站星站钟差数据所带来的复现结果不稳定、精度低的问题。

③ 对单颗卫星进行筛选的办法,可以在遇到数据波动情况大时进行合理运用。同时在对几种不同的粗差剔除方法进行分析比较后,证明了粗差剔除对整个融合算法的影响。

通过数据融合将多台基准终端的星站钟差数据融合为具有更高精度的星站钟差数据,对于整个复现系统都至关重要,本文的研究结果也将为后续远程时间比对基准终端的星站钟差融合算法的工程实现提供参考。

## 参考文献:

- [1] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉.一种高精度的国家标准时间远程复现方法[J].武汉大学学报(信息科版),2018,43(2):188-193.
- [2] 刘娅,陈瑞琼,赵志雄,等. UTC(NTSC)远程高精度复现方法研究及工程实现[J].时间频率学报,2016,39(3):178-192.
- [3] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉.基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J].仪器仪表学报,2016,37(4):757-763.
- [4] 赵当丽,翟慧生,胡永辉,等.利用卫星共视比对系统实现电网的时间同步[J].现代电力,2010,27(2):70-73.
- [5] 陈瑞琼,刘娅,杨莹,等.基于不同共视周期的标准时间远程复现分析[J].仪器仪表学报,2018,39(5):33-39.
- [6] 韩松岳,刘娅,王嘉琛,等.标准时间远程复现系统的不同比对技术对比分析[J].时间频率学报,2022,45(4):247-253.
- [7] 陈瑞琼. UTC(NTSC)远程复现方法研究与工程实现[D].西安:中国科学院大学(国家授时中心),2016.
- [8] 江志恒. GPS 全视法时间传递回顾与展望[J].宇航计测技术,2007(S1):53-71.
- [9] 陈婧亚,许龙霞,李孝辉.接收机位置误差对GNSS定时的影响分析[J].仪器仪表学报,2017,38(6):1458-1465.
- [10] STEINBERG A N, BOWMAN C L, WHITE F E. Revisions to the JDL data fusion model[J]. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1999(3719):430-441
- [11] 《北方建筑》编辑部.数据融合技术[J].北方建筑,2021,6(5):36.
- [12] 高翔,王勇.数据融合技术综述[J].计算机自动测量与控制,2002,10(11):706-709.
- [13] SIEGMUND D O. Error probabilities and average sample number of the sequential probability ratio test[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological, 1975,37(3):394-401.
- [14] 于佳会,刘佳静,郑建明.多源多维数据融合研究态势:理论、方法与应用[J].情报杂志,2022,41(5):133-138+207.
- [15] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006:78.
- [16] 吴昊,王深远.基于拉伊达准则的GNSS变形监测异常数据识别算法[J].科技创新与生产力,2019(1):30-34.
- [17] 王雁来,王钰,王传霸.一种用于提高北斗短报文通信成功率的基于数据特征提取的数据融合算法[J].计算机测量与控制,2022,30(5):186-190.